

VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ ALL'INQUINAMENTO DA NITRATI NELLA FALDA SUPERFICIALE DELLA PIANA DEL RIO CIXERRI (SARDEGNA MERIDIONALE, ITALIA)

ASSESSMENT OF GROUNDWATER VULNERABILITY TO NITRATE CONTAMINATION IN THE SURFICIAL AQUIFER OF THE RIO CIXERRI PLAIN (SOUTH SARDINIA, ITALY)

M. LOREDANA BRANGI⁽¹⁾, CLAUDIA MANNAI⁽²⁾, MAURIZIO TESTA⁽³⁾, GABRIELE URAS⁽⁴⁾

⁽¹⁾ libero professionista, Italia - loredanabrange@yahoo.it

⁽²⁾ Università degli Studi di Cagliari - Dipartimento di Ingegneria del Territorio - Sezione di Geologia Applicata e Geofisica Applicata
Via Marengo, 3 - 09123 Cagliari (Italy) - claudia.mannai@tiscali.it - 00393403522623

⁽³⁾ ARPA Sardegna, Cagliari, (Italy) - mauriziotesta@progemisa.net

⁽⁴⁾ Università degli Studi di Cagliari - Dipartimento di Ingegneria del Territorio - Via Marengo, 3 - 09123 Cagliari (Italy) - urasg@unica.it,

RIASSUNTO

Nella piana del rio Cixerri sono stati rilevati, durante il monitoraggio delle acque sotterranee, previsto dal Piano di Tutela delle Acque della Regione Sardegna, tenori di nitrati in falda elevati. La presenza di nitrati nei corpi idrici sotterranei si deve prevalentemente all'uso di fertilizzanti (minerali ed organici) in agricoltura, agli scarichi civili e industriali, alle perdite da fognature e allo smaltimento puntuale da pozzi neri.

Per la stima del rischio potenziale di inquinamento è stato applicato il metodo SINTACS, finalizzato alla valutazione della vulnerabilità intrinseca delle acque sotterranee, integrato all'analisi dei Centri di Pericolo (CDP) e all'indice di pericolosità di inquinamento da nitrati di origine agricola (IPNOA). Tali metodologie hanno permesso la valutazione del rischio specifico all'inquinamento da nitrati. Per la realizzazione degli strati informativi previsti da tali metodologie i dati, raccolti e rilevati, sono stati inseriti in un database e gestiti in ambiente GIS per meglio rappresentare lo scenario dell'inquinamento da nitrati.

TERMINI CHIAVE: vulnerabilità degli acquiferi, nitrati, SINTACS, IPNOA, Sardegna, Italia

INTRODUZIONE

L'uso intensivo in agricoltura di fertilizzanti chimici azotati e di residui organici di origine animale ha determinato in vaste aree degli stati dell'Unione Europea un progressivo deterioramento della qualità delle acque, specialmente per quanto attiene al contenuto in nitrati. Per la salvaguardia della salute l'Unione Europea ha emesso una serie di direttive atte alla risoluzione dei problemi inerenti le acque e in particolare la Direttiva in materia di nitrati (91/676/CEE), che mira a ridurre la quantità di fertilizzanti in agricoltura. Tra le varie misure si fa obbligo ai Paesi dell'Unione di individuare le Zone Vulnerabili ai Nitrati (ZVN), di elaborare dei codici di buona pratica agricola e di definire i programmi di azione che stabiliscano le modalità di utilizzo dei reflui zootecnici. La Direttiva 91/676/CEE è stata recepita nella normativa nazionale con il D.Lgs 152/99.

Il D.Lgs 31/01 recepisce la Direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano, indicando in 50 mg/L, il limite di nitrato (NO₃) consentito per l'utilizzo delle acque a scopo potabile. L'emanazione del D.Lgs 152/06 prevede, infine, il recepimento

ABSTRACT

Results of groundwater monitoring in the Rio Cixerri plain, envisaged by Sardinia's Water Protection Plan, revealed high nitrate content. The presence of nitrates in groundwater bodies can be attributed chiefly to the use of mineral and organic fertilizers, municipal and industrial wastewater discharges, sewer leakage and cesspit sewage disposal.

In order to assess the potential risk for groundwater contamination we used the SINTACS method for evaluating intrinsic vulnerability, supplemented with the hazard zones analysis and hazard index for agricultural nitrate groundwater contamination (Italian acronym IPNOA). In this way it was possible to assess the specific risk of nitrate contamination. To create the information layers envisaged by these methods, the gathered data were entered into a database and handled in a GIS environment for best representing the nitrate contamination scenario.

KEY WORDS: aquifer vulnerability, nitrates, SINTACS, IPNOA, Sardinia, Italy

INTRODUCTION

The intensive use of nitrogenous fertilizers and animal waste has led to the progressive deterioration of water quality, especially in terms of nitrate content, in extensive areas of EU countries. The EU has passed a series of directives for the protection of human health, with a view to solving water related issues, in particular the nitrates Directive 91/676/EEC aimed at reducing the use of fertilizers in agriculture. The Directive obliges member states to identify nitrate vulnerable zones (NVZ), to establish codes of good agricultural practice and to put in place action programmes for regulating the use of livestock manure. Directive 91/676/EEC has been transposed into Italian Law by Decree Law No. 152/99.

Directive 98/83/CE concerning the quality of water intended for human consumption has been transposed into Italian legislation by Decree Law No. 31/01. This establishes as 50 mg/L the permissible limit for nitrates (NO₃) in drinking water. Lastly Decree Law 152/06 transposes the Water Framework Directive 2000/60/EC. By means of this directive, the EU provides for the management of inland surface

Fig. 1 - Localizzazione degli Acquiferi potenzialmente vulnerabili da nitrati: (1) Acquifero dei Carbonati Mesozoici della Nurra; (2) Acquifero Detritico-Alluvionale Plio-Quaternario della Marina di Sorso; (3) Acquifero delle Vulcaniti Plio-Pleistoceniche del Logudoro; (4) Acquifero Detritico-Alluvionale Plio-Quaternario del Campidano, nel quale è stata designata la ZVN di Arborea; (5) Acquifero Detritico-Alluvionale Plio-Quaternario del Cixerri. Per la valutazione della reale vulnerabilità da nitrati di origine agricola degli acquiferi è necessario approfondire su questi siti le indagini idrogeologiche, mediante studi di dettaglio, campionamenti ed analisi. Infine, lo scopo del seguente studio è la valutazione della vulnerabilità all'inquinamento da nitrati di origine agricola dell'acquifero Detritico-Alluvionale Plio-Quaternario della piana del rio Cixerri

- Location of aquifers potentially vulnerable to nitrate contamination: (1) Mesozoic carbonate aquifer of the Nurra region; (2) Plio-Quaternary detrital-alluvial aquifer at Marina di Sorso; (3) Plio-Pliostocene volcanic rock aquifer of the Logudoro region; (4) Plio-Quaternary detrital-alluvial aquifer of the Campidano region, where the NVZ of Arborea have been designated; (5) Plio-Quaternary detrital-alluvial aquifer of the Cixerri. A reliable assessment of groundwater vulnerability to agricultural nitrates in these areas requires a more detailed hydrogeological investigation, including sampling and analyses. The purpose of this study is to assess the vulnerability to contamination by agricultural nitrates of the Plio-Quaternary detrital-alluvial aquifer of the River Cixerri plain

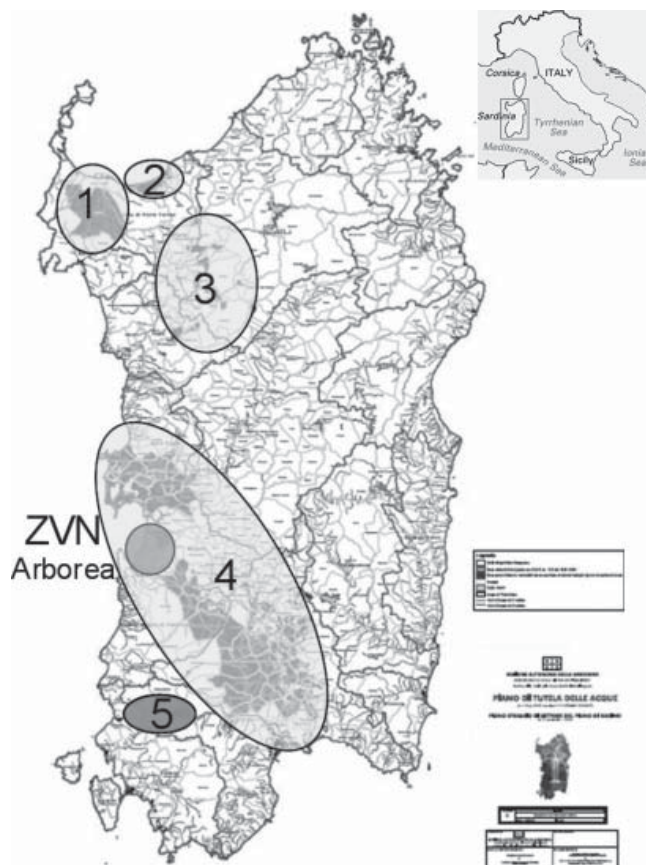
mento della Direttiva quadro sulle acque 2000/60/CE. Attraverso tale direttiva l'Unione Europea organizza la gestione delle acque interne superficiali, sotterranee, di transizione e costiere allo scopo di prevenirne e ridurne l'inquinamento, promuoverne l'utilizzo sostenibile, proteggere l'ambiente, migliorare le condizioni degli ecosistemi acquatici, mitigare gli effetti delle inondazioni e della siccità.

Nelle aree urbanizzate le alte concentrazioni di NO_3 non sempre sono attribuibili ad origini agricole, ma anche a scarichi civili e industriali. Infatti in alcune aree non si devono trascurare le perdite dalle fognature (spesso vecchie e usurate) e lo smaltimento puntuale delle acque nere.

Proprio in tale ottica le attività svolte nell'ambito del Piano di Tutela delle Acque, al fine del recepimento del D.Lgs. 152/99, ed in particolare gli studi relativi alle acque sotterranee, hanno permesso la designazione della Zona Vulnerabile da Nitrati di Origine Agricola di Arborea (Regione Autonoma della Sardegna, deliberazione 01/2005). Tali studi hanno permesso anche l'individuazione, grazie alle considerazioni relative ai contenuti in nitrati delle acque sotterranee, alla vulnerabilità intrinseca degli acquiferi ed ai carichi potenziali del comparto agricolo e zootecnico, di situazioni di pericolo per le acque sotterranee. Sono state individuate situazioni compromesse sui seguenti cinque acquiferi:

- 1) Acquifero dei Carbonati Mesozoici della Nurra;
- 2) Acquifero Detritico-Alluvionale Plio-Quaternario della Marina di Sorso;
- 3) Acquifero delle Vulcaniti Plio-Pleistoceniche del Logudoro;
- 4) Acquifero Detritico-Alluvionale Plio-Quaternario del Campidano;
- 5) Acquifero Detritico-Alluvionale Plio-Quaternario del Cixerri.

Tali acquiferi possono quindi considerarsi potenzialmente vulnerabili da nitrati (Fig. 1).



waters, groundwater, transitional waters and coastal waters in order to prevent and reduce pollution, promote sustainable water use, protect the environment, improve the status of aquatic ecosystems and mitigate the effects of floods and droughts.

High NO_3 concentrations in urban areas are not always of agricultural origin but can also be caused by municipal and industrial wastewaters. In some areas leakage from old sewers in disrepair and black-water disposal points can also be responsible for high nitrate content.

In this perspective, the activities, in particular the groundwater studies, conducted within the frame of the Water Protection Plan for implementing Decree Law No. 152/99, made it possible to designate the nitrate vulnerable zones in Arborea (Autonomous Region of Sardinia, Resolution 01/2005). The findings of these studies, which included determination of nitrate content in groundwater, were also used to assess intrinsic aquifer vulnerability, to determine the potential nitrate load for agriculture and livestock, and to identify groundwater risk areas. The following five aquifers were found to be potentially vulnerable to nitrate contamination (Fig. 1).

- 1) Mesozoic carbonate aquifer of the Nurra region;
- 2) Plio-Quaternary detrital-alluvial aquifer at Marina di Sorso;
- 3) Plio-Pliostocene volcanic rock aquifer of the Logudoro region;
- 4) Plio-Quaternary detrital-alluvial aquifer of the Campidano region;
- 5) Plio-Quaternary detrital-alluvial aquifer of the Cixerri.

MODELLI PARAMETRICI PER L'ANALISI DELLA VULNERABILITÀ INTRINSECA E LA VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DEI NITRATI SULLE RISORSE IDRICHE SOTTERRANEE

La vulnerabilità intrinseca esprime il grado di esposizione al pericolo di inquinamento delle acque sotterranee determinato da condizioni naturali (climatologia, geologia, pedologia, idrogeologia) e indipendente dalla presenza di fonti di inquinamento. Se al concetto di vulnerabilità intrinseca si lega l'effettiva ubicazione di infrastrutture o attività antropiche collegate allo sfruttamento delle acque sotterranee o che abbiano ripercussione sulle stesse, si giunge alla definizione della vulnerabilità integrata. La vulnerabilità specifica, invece, fa riferimento ad uno specifico inquinante e tiene conto delle sue caratteristiche e delle sue relazioni con le diverse componenti della vulnerabilità intrinseca (CIVITA, 1994).

In letteratura si trovano diversi approcci per la valutazione della vulnerabilità intrinseca, la metodologia scelta per il presente studio fa parte dell'insieme dei sistemi a punteggi e pesi PCSM (Point Count System Model), nei quali accanto ai punteggi attribuiti ai parametri base del metodo si associano una o più linee di pesi moltiplicatori. Questi hanno la funzione di amplificare l'importanza di uno o più parametri nella valutazione finale, secondo la particolare situazione idrogeologica o di impatto antropico.

La struttura di valutazione della vulnerabilità intrinseca nel metodo SINTACS (CIVITA, 2000; CIVITA *et alii*, 2000) consiste nella stima quantitativa, commutata in un punteggio, di una serie di parametri d'ingresso (sette parametri dipendenti dalle caratteristiche del sito, le cui iniziali formano l'acronimo SINTACS: Soggiacenza, Infiltrazione efficace, effetto di autodepurazione del Non saturo, Tipologia della copertura, caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero, Conducibilità idraulica dell'acquifero e acclività della Superficie topografica) e una serie di pesi moltiplicatori. A ciascun parametro, suddiviso per intervalli di valori e/o per tipologie, viene attribuito un punteggio crescente (da 1 a 10), in funzione dell'influenza sulla vulnerabilità stessa. I pesi moltiplicatori sono diversi per ogni fattore considerato e amplificano il punteggio in misura direttamente proporzionale all'importanza che il medesimo assume nel determinare il grado di vulnerabilità totale e che quindi consentono di accrescere l'importanza che si vuole dare ai singoli parametri.

La vulnerabilità intrinseca finale, l'indice SINTACS, si ottiene dalla sovrapposizione delle sette carte, ottenute dalla sommatoria dei prodotti dei punteggi per i pesi. L'indice di vulnerabilità così ottenuto viene messo in relazione con il grado di vulnerabilità, variabile da bassissimo fino a assai elevato (CIVITA, 2000; CIVITA *et alii*, 2000).

Il metodo IPNOA (PADOVANI *et alii*, 2002) ricalca l'approccio del D.Lgs. 152/2006 (Allegato 7/A) al problema dei nitrati di origine agricola; esso considera infatti due insiemi di fattori:

- fattori di pericolo, mediante i quali viene stimata la quantità di azoto applicata alla superficie del terreno (uso di fertilizzanti minerali ed organici, pesticidi e fanghi di depurazione);
- fattori di controllo, che influenzano in senso positivo la risposta di un sito in funzione delle caratteristiche del terreno, delle pratiche

PARAMETRIC MODELS FOR ANALYSING INTRINSIC VULNERABILITY AND FOR EVALUATING THE IMPACT OF NITRATES ON GROUNDWATER RESOURCES

Intrinsic vulnerability expresses the degree to which groundwater is exposed to the danger of contamination as defined by natural conditions (climate, geology, soils, hydrogeology) irrespective of the existence of pollution sources. If we associate the concept of intrinsic vulnerability with the actual location of infrastructures or human activities related with groundwater exploitation, or that have repercussions thereon, then we are able to define integrated vulnerability. Specific vulnerability on the other hand refers to a specific contaminant and takes into account its characteristics and relationships with the different components of intrinsic vulnerability (CIVITA, 1994).

Several approaches are reported in the literature for assessing intrinsic vulnerability. The method used here forms part of the PCSM scores and weights system (Point Count System Model), whereby to the scores assigned to the method's basic parameters, one or more strings of multiplier weights are associated. The purpose of these is to augment the importance of one or more parameters in the final assessment, depending on the specific hydrogeologic situation or anthropogenic impact.

Intrinsic vulnerability assessment using the SINTACS method (CIVITA, 2000; CIVITA *et alii*, 2000) consists in quantitatively estimating a series of input parameters that are then transformed into scores. There are seven parameters (in Italian the initials form the acronym SINTACS) describing the site characteristics: depth to water table, net recharge, impact of vadose zone, type of overburden, hydrogeological characteristics of the aquifer, hydraulic conductivity and topography (slope) and a series of multiplier weights. To each parameter, grouped by range of values or by type, a score from 1 to 10 is assigned, depending on its influence on vulnerability. The multiplier weights differ for each factor examined and increase the score in a manner directly proportional to the importance of that parameter in determining the overall degree of vulnerability thus allowing to augment the importance to be assigned to each parameter.

The ultimate intrinsic vulnerability, the SINTACS index, is obtained by superimposing the seven maps, summing the products of the scores times the weights. This vulnerability index thus obtained is correlated with the degree of vulnerability, ranging from very low to extremely high (CIVITA, 2000; CIVITA *et alii*, 2000).

The IPNOA method (PADOVANI *et alii*, 2002) follows closely the approach outlined in Decree Law No. 152/2006 (Annex 7/A) for nitrates of agricultural origin. Two sets of factors are considered:

- risk factors, (use of mineral and organic fertilizers, pesticides and sewage sludge) used to determine the amount of nitrogen applied to the land surface;
- control factors, (soil nitrogen content, climate, agricultural practices and irrigation) that have a positive effect on site response, depen-

agricole ivi adottate e del clima locale (contenuto di azoto nel terreno, clima, pratiche agricole e irrigazione).

L'indice IPNOA è ottenuto dalla somma dei tre fattori di pericolo moltiplicati per il prodotto dei quattro fattori di controllo.

AREA IN STUDIO

La valle del Rio Cixerri (Fig. 1 - acquifero 5), situata nella parte Sud-Occidentale dell'Isola, è per estensione e importanza la seconda depressione della Sardegna. Ha una lunghezza di circa 26 km, una larghezza media di 8 km ed una superficie di circa 27000 ha. I bordi nord e sud della valle sono costituiti da due corrugamenti montuosi che, partendo dai piedi dei monti Iglesienti e Sulcitani, degradano poi ad est verso il Campidano. Il rio Cixerri, che da il nome alla piana, è lungo circa 75 km. Poco a valle di Siliqua lo sbarramento di una diga a gravità massiccia (Genna Is Abis) ha creato un bacino per la regolamentazione delle acque e l'approvvigionamento per usi agricoli, civili e industriali.

La piana, orientata E-W è costituita da un basamento paleozoico ricoperto dai sedimenti continentali paleogenici della Formazione del Cixerri, attraversati da masse eruttive del Terziario vulcanico e coperta da alluvioni del Quaternario (BARCA *et alii*, 1973; MAXIA, 1935).

I valori di precipitazione sono compresi tra un minimo di 495 mm/anno della stazione di Decimomannu ed un massimo di 820 mm/anno della stazione di S.Giovanni, con una media, calcolata con il metodo dei topoi pari a 663 mm/anno. La temperatura media annua si attesta sul valore di 17°C.

Sebbene la falda contaminata abbia scarse potenzialità, a causa della bassa trasmissività legata al basso spessore dell'acquifero, rappresenta comunque una preziosa risorsa per l'economia del territorio in quanto viene utilizzata per l'integrazione dell'acqua fornita dal Consorzio di Bonifica del Cixerri.

La valutazione dello stato chimico delle acque sotterranee della piana del rio Cixerri è stata effettuata prendendo in considerazione le classi di qualità del D.Lgs. 152/99, in cui lo stato chimico è definito da 5 classi e si basa sull'analisi di 7 parametri: CES (Conducibilità elettrica specifica), Cloruri, Manganese, Ferro, Nitrati, Solfati, Ione ammonio.

La campagna di prelievi ha avuto luogo nei mesi di Novembre e Dicembre 2006, riguardando 51 punti d'acqua dell'acquifero freatico. Su ciascun punto è stata fatta un'analisi di tipo speditivo che comprende misure di parametri quali: pH, CES, Eh (potenziale di ossidoriduzione), temperatura aria, temperatura acqua e livello piezometrico. In 46 punti d'acqua sono stati inoltre prelevati dei campioni che successivamente sono stati analizzati in laboratorio, le analisi hanno riguardato i parametri di base utili per la classificazione chimica e ulteriori parametri importanti per definire lo stato geochimico: durezza, residuo fisso, nitriti, bicarbonati, calcio, sodio, potassio, magnesio. La durezza, i cloruri e i bicarbonati sono stati analizzati mediante titolazione; i nitrati, i nitriti e lo ione ammonio tramite spettrometria (colorimetria); gli ioni potassio, sodio, calcio, magnesio, solfati, ferro e manganese con la tecnica analitica ICP-MS (Inductively coupled plasma-mass spectrometry); il residuo fisso è stato determinato con l'analisi gravimetrica.

ding on soil properties, agricultural practices and local climate.

The IPNOA index is obtained by summing the three risk factors multiplied by the product of the four control factors.

STUDY AREA

The Rio Cixerri valley in SE Sardinia (Fig. 1 - aquifer 5), the island's second most extensive depression, is around 26 km long, 8 km wide and covers a surface area of some 27,000 ha. The northern and southern edges of the valley consist of two mountain folds that, from the foot of the Iglesiente and Sulcitano mountains taper off eastwards toward the Campidano plain. The river Cixerri, from which the plain takes its name, is around 75 km long. The Genna Is Abis solid gravity dam, erected a little downstream from the town of Siliqua, has created a reservoir for regulating water supplies for agricultural, domestic and industrial use.

The E-W trending plain is composed of a Palaeozoic basement overlain by Palaeogene continental sediments of the Cixerri Formation, cross-cut by massive Tertiary volcanic rock, in turn overlain by Quaternary alluvium (BARCA *et alii*, 1973; MAXIA, 1935).

Precipitation ranges from a minimum of 495 mm/year, recorded at Decimomannu weather station, to a maximum of 820 mm/year at S.Giovanni, giving an annual mean of 663 mm/year based on isohyets. Mean annual temperature is around 17°C.

In spite of its poor productivity, on account of its being shallow transmissivity is low, the contaminated aquifer is nevertheless a precious resource for the region's economy, as the groundwater is exploited for supplementing water supplied by the River Cixerri Reclamation Authority.

The chemical status of the groundwater in the Rio Cixerri plain was determined considering the five quality classes as defined by Decree Law No. 152/99, based on the analysis of 7 parameters: SEC (specific electrical conductivity), chlorides, manganese, iron, nitrates, sulphates, ammonium ion.

Groundwater sampling was conducted in November and December 2006 at 51 points of the phreatic aquifer. Field analyses were performed at each well comprising measurements of: pH, SEC, Eh (oxidation potential), air temperature, water temperature and groundwater level. At 46 points water samples were collected for laboratory analysis to determine basic parameters used for chemical classification and other parameters for determining geochemistry: hardness, fixed residue, nitrite, bicarbonate, calcium, sodium, potassium and magnesium. Hardness, chloride and bicarbonate were determined by means of titration, nitrate, nitrite and ammonium ion using a spectrophotometer; potassium, sodium, calcium, magnesium, sulphate, iron and manganese ions with ICP-MS (Inductively coupled plasma-mass spectrometry); the dry residue was determined by gravimetric analysis.

Table 1 shows the number of samples in each of the quality classes for each parameter specified in the regulations:

ASSESSMENT OF GROUNDWATER VULNERABILITY TO NITRATE CONTAMINATION IN THE SURFICIAL AQUIFER OF THE RIO CIXERRI PLAIN (SOUTH SARDINIA)

Il numero di campioni ricadente nelle singole classi di qualità chimica, per ciascun parametro previsto dalle normative, è riportato nella Tab. 1.

As far as nitrate is concerned, concentrations ranged from a minimum of 0.4 mg/L (detection limit) to a maximum of around 260 mg/L As can be seen from Figure 3 and from Figure 4 the majority

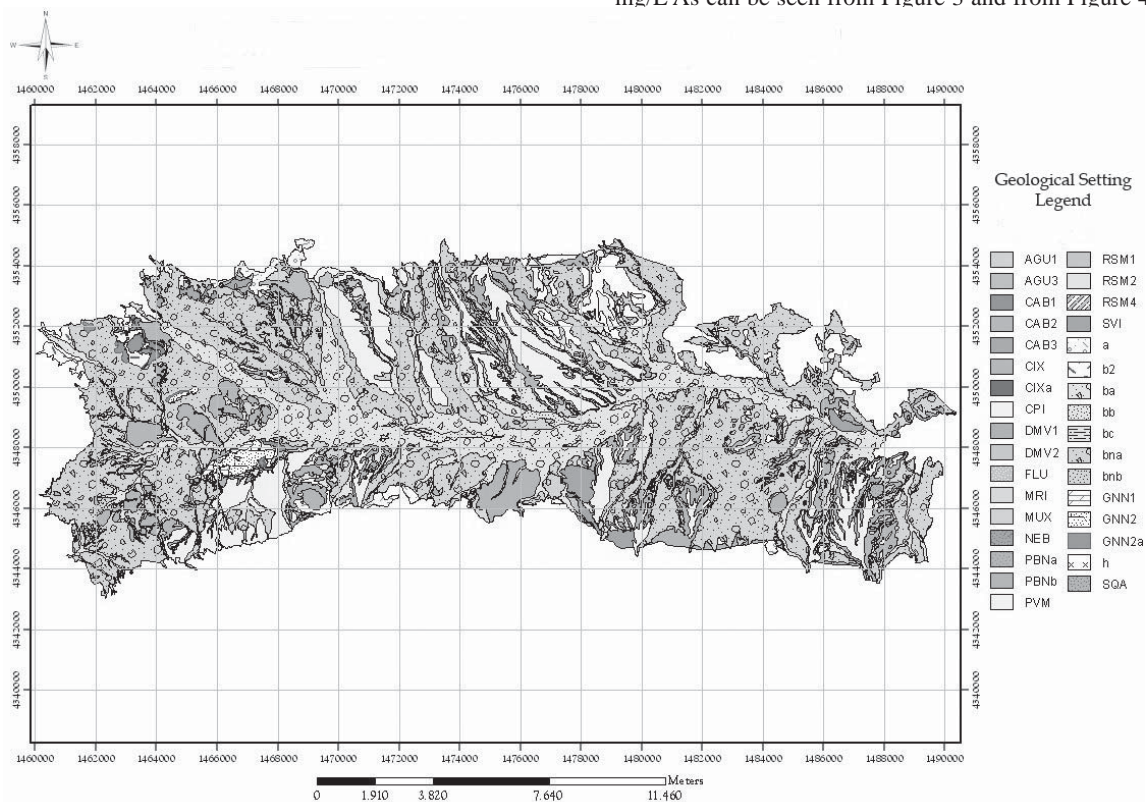


Fig. 2 - Carta dell'inquadramento geologico della Piana del Rio Cixerri (Formazioni del basamento metamorfico Paleozoico: NEB metarenarie della formazione di Nebida; GNN₁-GNN₂-GNN_{2a} calcareo ceroido e dolomia rigata della formazione di Gonnese; CPI calcareosi della formazione di Campo Pisano; CAB₁-CAB₂-CAB₃ scisti della formazione di Cabitza; AGU1-AGU3 "puddinga" della formazione di Monte Argentu; MRI metasiltiti e metarenarie della formazione di Monte Orri; DMV1- DMV2 metasiltiti, metapeliti e metarenarie della formazione di Domusnovas; RSM₁-RSM₂-RSM₄ metasiltiti, metapeliti, metarenarie, metabrecce e metaconglomerati della formazione di Rio San Marco; MUX "Scisti a Graptoliti" della formazione di Genna Muxerru; FLU "Calcarei ad Orthoceras" della formazione di Fluminimaggiore; SVI Arenarie di San Vito. Successioni vulcano sedimentarie terziarie: CIX-CIXa argille siltose della formazione del Cixerri; PBN_a-PBN_b daciti e andesiti di Monte Sa Pibionada; SQA piroclastici di Siliqua. Depositi quaternari: PVM ghiaie con subordinate sabbie del Sintema di Portovesme; b_{na}-b_{nb} depositi alluvionali terrazzati rispettivamente ghiaie e sabbie prevalenti; a depositi di versanti; b₂ coltri eluvio-colluviali; b_a-b_b-b_c depositi alluvionali rispettivamente ghiaie, sabbie e limi prevalenti; h depositi antropici)

- Map of geological setting of the Rio Cixerri Plain. Formations of the metamorphic Palaeozoic basement: NEB metasandstone of the Nebida formation; GNN₁-GNN₂-GNN_{2a} ceroid limestone and striped dolestone of the Gonnese formation; CPI calcareous schist of the Campo Pisano formation; CAB₁-CAB₂-CAB₃ schist of the Cabitza formation; AGU1-AGU3 pudding stone of the Monte Argentu formation; MRI metasiltite and metasandstone of the Monte Orri formation; DMV1- DMV2 metasiltite, metapelite and metasandstone of the Domusnovas formation; RSM₁-RSM₂-RSM₄ metasiltite, metapelite, metasandstone, metabreccia and metaconglomerate of the Rio San Marco formation; MUX graptolite schist of the Genna Muxerru formation; FLU Orthoceras limestone of the Fluminimaggiore formation; San Vito Sandstone. Tertiary volcano-sedimentary sequences: CIX-CIXa silty clay of the Cixerri formation; PBN_a-PBN_b dacite and andesite of Monte Sa Pibionada; SQA pyroclastic rock of Siliqua. Quaternary deposits: PVM gravel with subordinate sand of the Portovesme Synthem; b_{na}-b_{nb} alluvial terrace deposits chiefly gravel and sand respectively; a slope deposits; b₂ eluvial-colluvial mantle; b_a-b_b-b_c alluvial deposits chiefly of gravel, sand and silt respectively; h anthropogenic deposits

	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄	Fe	Mn	SEC
class 1	0	30	8	1	43	36	0
class 2	25	15	13	38	3	2	39
class 3	0	0	9	0	0	0	0
class 4	21	1	16	7	0	8	7

Tab. 1

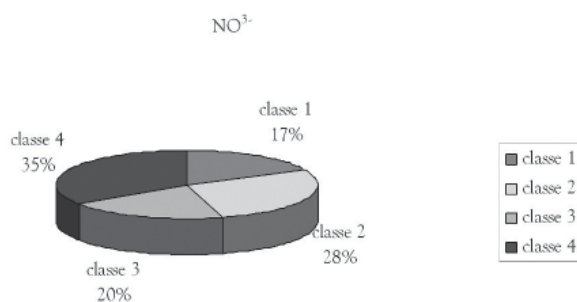


Fig. 3 - Percentuale di campioni ricadenti nelle 4 classi di qualità chimica per il parametro nitrati
- Percentage of samples in the 4 chemical quality classes for nitrate content

Per quanto concerne il parametro nitrati si è rilevata una concentrazione che si attesta tra minimo di 0,4 mg/L (coincide con il limite strumentale) ed un massimo di circa 260 mg/L. Come si può notare dalla Figura 3 e dalla Figura 4 la maggior parte dei campioni ricade nelle classi 4 (35%) e 3 (20%).

APPLICAZIONE DELLE METODOLOGIE

I sistemi informativi geografici (GIS) sono uno strumento adeguato per l'applicazione dei metodi parametrici, che prevedono un overlay mapping dei tematismi. Per la costruzione delle carte tematiche sono stati utilizzati principalmente i software: Autocad, ArcView GIS 3.2 e ArcGis 9.2.

La suddivisione del territorio in esame in aree discrete per l'applicazione delle metodologie SINTACS e IPNOA è stata effettuata attraverso una griglia regolare a maglie quadrate da 100 m di lato; l'area studiata risulta quindi discretizzata in 36057 elementi finiti quadrati (EFQ).

Applicazione del metodo SINTACS

Gli scenari relativi alle situazioni idrogeologiche e di impatto sono stati individuati sulla base delle informazioni estrapolabili dalla Carta d'uso del suolo, dalla Carta geologica e dalla Carta delle aree inondabili (sub-bacino n° 7 Flumendosa - Campidano - Cixerri). E' stata operata una zonazione del territorio secondo i cinque scenari proposti dal metodo SINTACS: impatto normale, impatto rilevante, drenaggio, carsismo, fessurato.

Dall'analisi della Carta della vulnerabilità intrinseca (Fig. 5), ottenuta con le metodiche descritte in precedenza, si evince quanto segue:

- le zone a cui compete il grado di vulnerabilità bassissima risultano essere poco diffuse e poco estese e si riscontrano in corrispondenza dei versanti del Basamento metamorfico Paleozoico (M.te Ollastu) e delle Successioni Vulcano-Sedimentarie Terziarie (M.te Truxionis, M.te Exi e Sa Guardia de Muscurai), mentre un grado basso si rileva in corrispondenza delle pendici di tali rilievi;
- i valori di vulnerabilità media rappresentano delle "isole" all'interno del territorio di pianura tra i paesi di Domusnovas e Siliqua e lungo i bordi del bacino e risultano poco rappresentate;

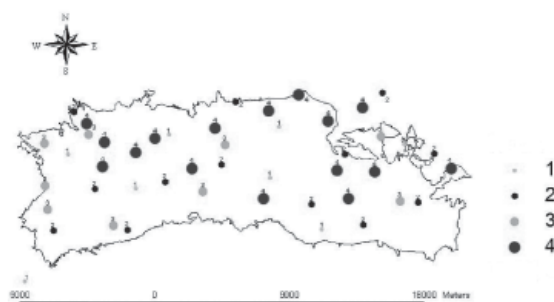


Fig. 4 - Carta con la localizzazione dei punti di prelievo e valori puntuali (classi di qualità) dei nitrati
- Map showing location of sampling points and values (quality classes) for nitrate

of samples fall into class 4 (35%) and class 3 (20%).

METHODS

Geographic information systems (GIS) are a useful tool for implementing parametric methods that envisage thematic map overlay mapping. The thematic maps have been compiled using mainly Autocad, ArcView GIS 3.2 and ArcGis 9.2 software.

In order to apply the SINTACS and IPNOA methods, the study area was divided into discrete elements using a regular 100 x 100 m square grid, obtaining 36,057 finite elements.

SINTACS method

The scenarios concerning the hydrogeological setting and impact were determined from information contained in the land use, geological and flood prone areas maps (sub-basin No. 7 Flumendosa - Campidano - Cixerri). The area was zoned in accordance with the five scenarios proposed for the SINTACS method: normal impact, major impact, drainage, karst phenomena, fractured.

Examination of the intrinsic vulnerability map (Fig. 5), obtained using the previously described methods, shows that:

- the few zones with very low vulnerability are confined to small areas coinciding with the slopes of the metamorphic Palaeozoic basement (M.te Ollastu) and with the Tertiary volcano-sedimentary sequences (M.te Truxionis, M.te Exi and Sa Guardia de Muscurai), while at the foot of these hills vulnerability is low;
- moderate vulnerability is found in a few isolated zones in the lowland between the towns of Domusnovas and Siliqua and along the edges of the basin;
- the floodplain and the valley bottom of the main river courses (Rio Cixerri and its tributaries) are characterised by high vulnerability.

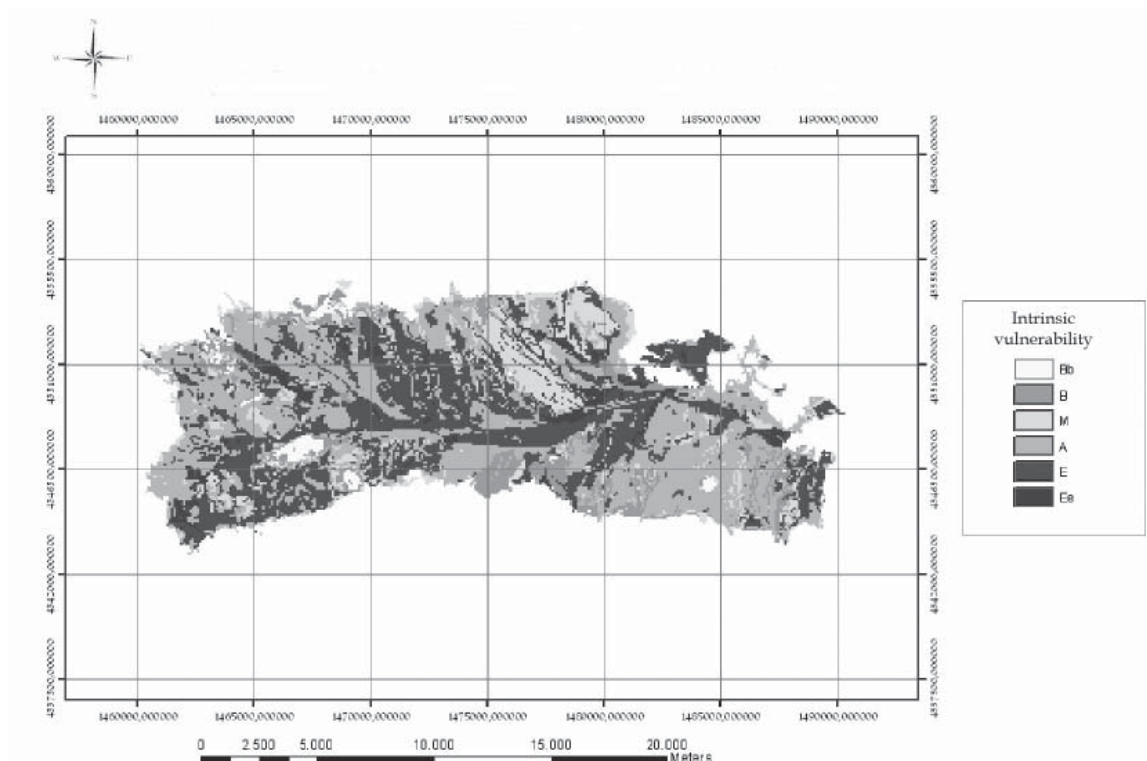


Fig. 5 - Carta della vulnerabilità intrinseca (EE = Estremamente elevata; E = Elevata; A = Alta; M = Media; B = Bassa; BB = Bassissima) nella Piana del Rio Cixerri - *Intrinsic vulnerability map (EE = extremely high; E = very high; A = high; M = moderate; B = low; BB = very low) for the Rio Cixerri plain*

- la pianura alluvionale e il fondovalle delle principali aste fluviali (Rio Cixerri e i suoi affluenti) sono caratterizzati invece da gradi di vulnerabilità alta. La maggior parte dell'area di interesse ricade all'interno di questa classe;
- i valori più elevati del grado di vulnerabilità (Elevato e Estremamente) sono presenti in numerose aree e sono posti in corrispondenza dell'alveo e delle aree golenali del Rio Cixerri e dei suoi affluenti, nella zona a sud-ovest di Villamassargia, nella pianura compresa tra gli abitati di Domusnovas e Musei, a nord-est di Siliqua e in corrispondenza dello sbarramento sul Cixerri (Cixerri a Genna is Abis).

- Most of the study area falls in this class;
- very high and extremely high vulnerability values are found in numerous areas along the beds and riverside flatlands of the Rio Cixerri and its tributaries, to the SW of the town of Villamassargia, in the lowlands between Domusnovas and Musei, NE of Siliqua and at the Genna is Abis dam on the Rio Cixerri.

Applicazione del metodo IPNOA

Dall'applicazione del metodo IPNOA, si è ottenuta la carta mostrata in figura 6, da cui si evince che l'area in esame ricade nelle prime tre classi di pericolo: improbabile, molto basso, basso. In particolare la gran parte della zona di interesse è rappresentata nella classe di pericolo basso. Dalla carta si nota che le aree a pericolo potenziale improbabile sono quelle che appartengono al basamento metamorfico-paleozoico e alle successioni vulcano-sedimentarie-terziario.

Sulla base degli Indici di Vulnerabilità Intrinseca (SINTACS) e di Pericolosità (IPNOA) si è proceduto al calcolo del Rischio Potenziale di contaminazione delle acque sotterranee. Le 6 classi della vulnerabilità sono state moltiplicate per le 3 classi di pericolo poten-

IPNOA method

The map shown in Figure 6 was obtained using the IPNOA method. As can be seen, the study area falls into the first three classes: unlikely, very low, low hazard. For the most part, the area concerned is classed as low hazard. Note that the areas classified as unlikely are those belonging to the metamorphic Palaeozoic basement and to the Tertiary volcano-sedimentary sequences.

The potential risk of groundwater contamination was then calculated on the basis of the intrinsic vulnerability (SINTACS) and hazard (IPNOA) indexes. The 6 vulnerability classes were multiplied by the three hazard classes determined for the study area, to obtain the risk scores which are then grouped into 6 classes in order of increasing

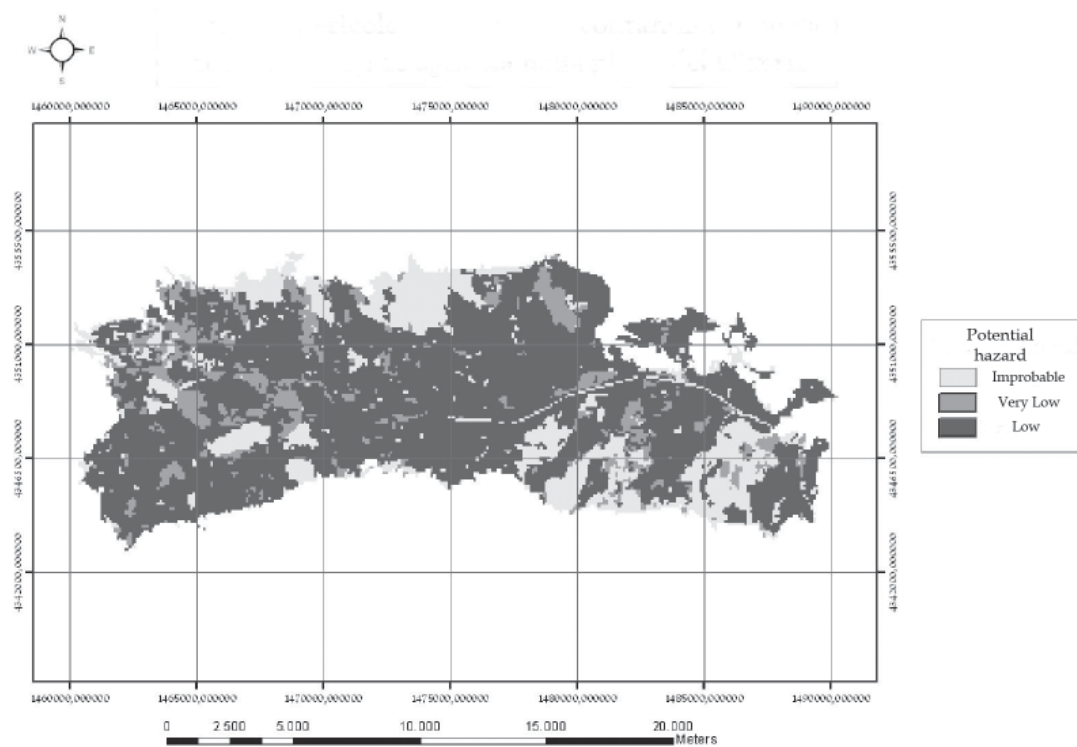


Fig. 6 - Carta del pericolo potenziale di contaminazione da nitrati di origine agricola nella Piana del Rio Cixerri
- Map of potential hazard of agricultural nitrate contamination in the Rio Cixerri plain

ziale ricavate nell'area di indagine, ottenendo il valore del rischio, riclassificato in 6 classi indicanti i livelli di rischio crescente da grado bassissimo ad estremamente elevato.

- Dall'analisi della Carta del Rischio Potenziale (Fig. 7) si deduce che:
- le zone a cui compete il rischio molto basso e basso risultano essere poco diffuse e poco estese e si riscontrano in corrispondenza dei versanti del basamento metamorfico paleozoico (M.te Ollastu, Marganai) e delle successioni vulcano-sedimentarie terziarie (M.te Truxionis, M.te Exi, Sa Guardia de Muscurai, Castello d'Acquafredda), in corrispondenza delle pendici di tali rilievi, nella zona di pianura nelle vicinanze del Castello d'Acquafredda ad ovest del Lago del Cixerri;
 - i valori di rischio moderato rappresentano delle vaste aree del territorio di pianura tra i paesi di Domusnovas e Siliqua e nella zona a sud dell'abitato di Iglesias. Anche queste aree sono poco rappresentate, risultando concentrate ma relativamente estese;
 - le ampie zone di pianura alluvionale presenti tra le zone urbanizzate e le aree golenali del Cixerri e dei suoi affluenti sono caratterizzate invece dal grado di rischio alto. La maggior parte dell'area di interesse ricade all'interno di questa classe;
 - i valori più elevati del grado di rischio (Elevato ed Estremamente elevato) sono presenti in numerose aree e sono posti in corrispondenza di parte dell'alveo e delle aree golenali del Rio Cixerri e dei suoi affluenti, nella zona a sud-ovest di Villamassargia, nella

risk from very low to extremely high.

Analysis of the potential risk map (Fig. 7) shows that:

- the few zones at low to very low risk are confined to small areas coincident with the slopes of the metamorphic Palaeozoic basement (Mt Ollastu, Marganai) and with the Tertiary volcano-sedimentary sequences (M.te Truxionis, M.te Exi and Sa Guardia de Muscurai, Acquafredda Castle), with the foot of these hills, and the lowlands near to Acquafredda Castle to the East of the Cixerri Lake;
- areas at moderate risk are the lowlands between Domusnovas e Siliqua and the area to the south of the town of Iglesias. Here again, there are few zones at moderate risk, but they are concentrated in relatively extensive areas;
- the broad expanses of floodplain between the built up areas and the riverside flatlands of the Rio Cixerri and its tributaries are classed as high risk areas. Most of the area concerned falls into this category;
- there are numerous areas at very high and extremely high risk and these are situated in part of the beds and riverside flatlands of the Rio Cixerri and its tributaries, to the SW of the town of Villamassargia, in the lowlands between Domusnovas and Musei, NE of Siliqua and at the Genna is Abis dam on the Rio Cixerri.

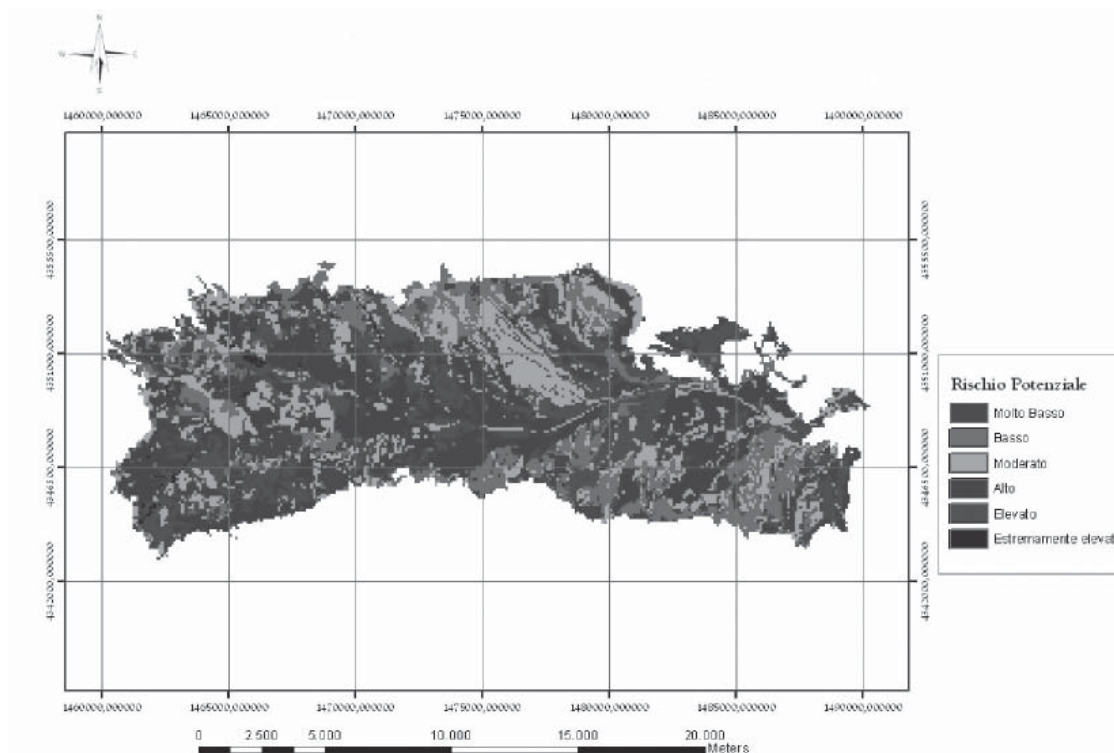


Fig. 7 - Carta del rischio potenziale di contaminazione da nitrati di origine agricola nella Piana del Rio Cixerri
 - Map of potential risk of agricultural nitrate contamination in the Rio Cixerri plain

pianura compresa tra gli abitati di Domusnovas e Musei, a nord-est di Siliqua e in corrispondenza dello sbarramento sul Cixerri (Cixerri a Genna is Abis).

VULNERABILITÀ ALL'INQUINAMENTO DA NITRATI: VALIDITÀ DEL METODO UTILIZZATO

La convalida dell'approccio metodologico può essere effettuata confrontando il grado di rischio potenziale con il grado di inquinamento effettivo fornito dalle analisi chimiche eseguite sui campioni prelevati dai punti d'acqua (Fig. 8).

Come già detto in precedenza la concentrazione dei nitrati nelle acque sotterranee è decisamente elevata, confermando la valutazione di rischio alto nella maggior parte del territorio.

Comparando la carta del rischio potenziale con l'ubicazione dei punti di prelievo si nota una discreta corrispondenza tra i settori con concentrazione di nitrati maggiore di 25 mg/L (rischio di inquinamento prossimo in assenza di interventi) e quelli con valori di rischio più elevati (alto, elevato, estremamente elevato). In particolare si nota come i pozzi gravati dal maggiore contenuto di nitrati sono quasi sempre localizzati o in aree a rischio alto o elevato/estremamente elevato. Ovviamente anche alcuni pozzi caratterizzati da concentrazioni di nitrati inferiori sono localizzati in aree ad elevato rischio.

NITRATE CONTAMINATION VULNERABILITY: VALIDITY OF THE METHOD USED

The validity of the methodological approach used here can be tested by comparing the degree of potential risk with the actual contamination levels chemically determined by chemical analysis of the water samples collected in the withdrawal points (Fig. 8).

As already mentioned, high nitrate concentrations were found in the groundwater, confirming the high risk identified for most of the area concerned.

Comparison of the potential hazard map with sampling points location shows that the areas with nitrate concentration of more than 25 mg/L (risk of contamination if no measures are taken) coincide fairly well with those at high, very high and extremely high risk. In particular, the wells with highest nitrate content are nearly always located in areas at high, very high and extremely high risk. Some wells containing groundwater with lower nitrate concentrations are of course also located in high risk areas.

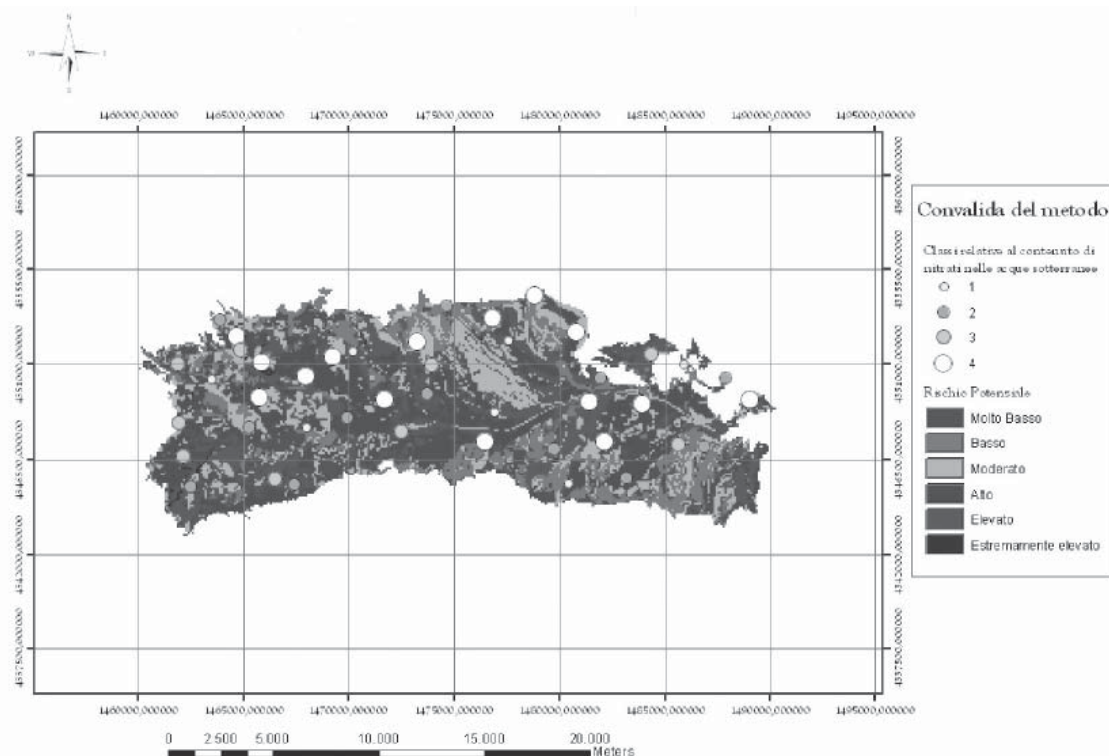


Fig. 8 - Carta di validazione del metodo utilizzato
- Validation map for the method used

CONCLUSIONI

Le esperienze riportate mettono in evidenza che l'applicazione dei modelli parametrici per la valutazione dell'impatto dei nitrati sulle risorse idriche sotterranee non può prescindere dalla creazione di un solido database di supporto. Tale database dovrebbe spaziare dai dati catastali, a quelli climatici, vegetazionali e delle infrastrutture, oltre a quelli geologici, pedologici e idrogeologici.

Dall'applicazione del metodo SINTACS si evince che gran parte dell'area di studio è soggetta a un grado di vulnerabilità intrinseca da alto a estremamente elevato.

L'applicazione del metodo IPNOA ha evidenziato, invece, un pericolo potenziale di inquinamento da nitrati di origine agricola mediamente basso. Tale risultato può derivare dal fatto che il metodo IPNOA è adatto a descrivere situazioni di impatto originate da attività di agricoltura e zootecnia intensive. Tale metodo, studiato e testato in aree fortemente sfruttate, nonostante sia stato modificato per meglio descrivere il contesto oggetto di questo studio, utilizzando tabelle aggiuntive per l'attribuzione dei valori dei parametri si è dimostrato non rispondente alla realtà territoriale nella definizione del pericolo reale. Il metodo risulta inoltre di complessa implementazione a causa della difficoltà a reperire i dati e per la carenza degli stessi nell'area regionale.

Nel territorio le attività agricole intensive non sono particolarmente diffuse, non sussistono eccessive situazioni d'impatto an-

CONCLUSIONS

The findings reported here demonstrate that the application of parametric models for assessing the impact of nitrates on groundwater resources must necessarily be supported by a comprehensive database. This should contain a wide variety of data including land registry information, information on climate, plant cover and infrastructures as well as geological, soil and hydrogeological data.

The results obtained with the SINTACS method indicate that for the most part the study area can be classified as having a very high or extremely high degree of vulnerability.

The IPNOA method on the other hand, indicated a low potential hazard of contamination by nitrates from agricultural sources. This is a result of the fact that this method has been devised for describing the impact produced by intensive agriculture and livestock farming. In fact, although we modified the method, which was originally studied and tested for intensively exploited lands, to better fit the context of the study area, using additional tables for assigning the parameter values, it did not, in the specific case, provide a realistic assessment of the actual hazard. Additionally, the method proves complicated to implement because of the difficulties in obtaining and lack of data for the region studied.

Intensive agriculture is not practised on a large scale and the study area is not subject to high pressure from anthropogenic activities, ex-

tropico, se non in aree circoscritte e l'utilizzo reale del territorio è contenuto. Si tratta di aree sterili, incolte, a vegetazione spontanea o colture che non richiedono uso di fitofarmaci, concimi chimici, né pratiche irrigue. In tali aree è realizzato sovente l'allevamento brado, sia stagionale che stanziale e solo in alcuni casi il bestiame è allevato in stalle con alta concentrazione di capi (in tutto il territorio ci sono più di 6300 suini, 4200 bovini, 130000 capi ovi-caprini).

Nella zona si è, quindi, in presenza di un inquinamento della falda dovuto a più fattori, quali: il pascolo brado, le attività agricole diffuse, la presenza di centri urbani e di case isolate distribuite sul territorio e prive di collegamento fognario, difficilmente implementabili nelle metodologie utilizzate. La procedura utilizzata necessita di ulteriori approfondimenti ai fini di una sua proficua applicazione a situazioni e siti diversi dal test site.

Il presente studio ha permesso di effettuare una valutazione esclusivamente statica, bisognosa di ulteriori confronti con dati analitici sperimentali ai fini di una stima temporale dell'evoluzione di fenomeni degradativi della qualità delle acque.

cept for some relatively small areas. On the whole, the land is not unduly exploited, being barren and uncultivated, and only spontaneous vegetation grows or crops that do not require pesticides, chemical fertilisers or irrigation. The most common activity is open pasture livestock farming on a seasonal or permanent basis. Only in few cases are animals farmed intensively in indoor environments (more than 6,300 pigs, 4,200 cattle, 130,000 sheep/goats are reared in the study area).

Thus, a number of factors are responsible for groundwater contamination, such as open pasture grazing, widespread agricultural activities, the presence of built up areas and scattered houses not connected to the sewage system and these are difficult to account for with the methods adopted here. The procedure used warrants further exploration so that it can be profitably applied to situations different from the test site.

The present study permitted a simply static evaluation but further research is needed, including comparison with the laboratory analytic data, in order to estimate the temporal evolution of the water quality degradation processes.

OPERE CITATE / REFERENCES

- BARCA S., MAXIA C. & PALMERINI V. (1973) - *Sintesi sulle attuali conoscenze relative alla Formazione del Cixerri (Sardegna Sud-Occidentale)*, Bollettino del Servizio Geologico d'Italia, **XCIV-II**: 307-318; Roma: Nuova Tecnica Grafica.
- CIVITA M. & DE MAIO M., (2000) - *Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico Sintacs R5*; **72**, Collana: "Quaderni di tecniche di protezione ambientale", Sezione Protezione delle acque sotterranee; Bologna: Pitagora Editrice.
- CIVITA M. (1994) - *Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: Teoria e Pratica*; **31**, Collana: "Quaderni di tecniche di protezione ambientale", Sezione Protezione delle acque sotterranee; Bologna: Pitagora Editrice.
- EEC, EUROPEAN ECONOMIC COMMUNITY (1991) - *Council Directive concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources*. Official Journal of the European Communities, 91/676/EEC.
- EC, EUROPEAN COMMUNITY (1998) - *Directive of the European Parliament and of the Council of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption*. Official Journal of the European Communities, 98/83/EC.
- EC, EUROPEAN COMMUNITY (2000) - *Directive of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. Official Journal of the European Communities, 2000/60/EC.
- ITALIA, "Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole"; Decreto Legislativo dell'11 maggio 1999, n. **152**.
- ITALIA, "Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano"; pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. **52** del 3 marzo 2001 - Supplemento Ordinario n. **41**; Decreto Legislativo 2 febbraio 2001, n. **31**.
- ITALIA, "Norme in materia ambientale"; pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile 2006 - Supplemento Ordinario n. 96, Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. **152**.
- MAXIA C. (1935) - *Contributo alla geomorfologia della Valle del Cixerri (Iglesiente)*; estr. da: Atti del 12° Congresso Geografico Italiano: 281-294, **1** c. di tav. : ill.: 25 cm; Cagliari : Società Editoriale Italiana.
- PADOVANI L. & TREVISAN M. (2002) - *I nitrati di origine agricola nelle acque sotterranee*; **75**, Collana: "Quaderni di tecniche di protezione ambientale", Sezione Protezione delle acque sotterranee, Bologna: Pitagora Editrice.
- REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA, Assessorato della Difesa dell'Ambiente, Servizio della Tutela delle Acque, Piano di tutela delle acque (Piano stralcio di settore del Piano di Bacino).
- REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA, Direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato da nitrati provenienti da fonti agricole. Designazione delle zone vulnerabili da nitrati di origine agricola; Deliberazione del 18/1/2005, **1/12**.

Received March 2009 - Accepted May 2009